

ADCPを用いた摩擦速度と掃流砂量の算定手法

METHOD FOR ESTIMATING SHEAR VELOCITY AND BEDLOAD DISCHARGE WITH ACOUSTIC DOPPLER CURRENT PROFILER

萬矢敦啓¹・岡田将治²・江島敬三³・菅野裕也⁴・深見和彦⁵

Atsuhiko Yorozuya, Shoji Okada, Ejima Keizo, Yuya Kanno, and Kazuhiko Fukami

¹正会員 Ph.D. 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 つくば市南原1-6)

²正会員 博士(工学) 高知工業高等専門学校 環境都市デザイン工学科 (〒783-8508 高知県南国市物部乙200-1)

³正会員 パシフィックコンサルタント株式会社 筑波実験場 (〒300-4204 茨城県つくば市作谷642-1)

⁴正会員 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 つくば市南原1-6)

⁵正会員 修士(工学) 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 つくば市南原1-6)

Bedload discharge measurement has been considered very important but very difficult, since observed results could not be justified as appropriated value, especially during large-scale flooding. As a matter of fact, field engineers experienced two different bedload discharges by three or four orders of magnitude with similar hydraulic conditions. To obtain appropriate representative values, authors have focused attention on 1) bedload velocity, which can be obtained by Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), 2) local shear velocity, which can be estimated by ADCP as well, and 3) thickness of bedload layer. With those three elements, authors compiled a bedload discharge measurement method, which can be used in actual rivers during flooding. For verifying the method, authors conducted an experimental study.

Key Words : *Acoustic Doppler Current Profiler, bedload discharge measurement, shear velocity*

1. はじめに

日本の掃流砂計測はバスケット型である土研式掃流採砂器を用いて日本全国で行われた¹⁾。山本らはこれらの結果と実験結果を比較することで特に $\tau_* = 0.3$ 以上での掃流採砂器による掃流砂量の把握の難しさを示唆している²⁾。また、アメリカ地質調査所は圧力差型のHelley-Smith式, Toutle-River-2 bedload sampler (TR-2)他を用いて掃流砂計測を行い、計測結果のばらつきを分析している。ここでは一時間に10回程度の計測で 10^3 程度異なる観測例が紹介されている³⁾。間接的な計測方法として、音圧を用いたもの⁴⁾、回転型サイドスキャンソナーを用いたもの⁵⁾など、設置型を含め新しい技術が開発されている。特に超音波技術を用いた横山らの手法は移動型として実用性が高く、現在でも活発な観測が行われている⁶⁾。

一方、掃流砂量の算定はDu Boyの研究から発しこれまで数多くの研究が行われている⁷⁾。これらの多くは掃流力もしくは有効掃流力の関数であるため、これらの正しい算定が掃流砂量式の精度を向上させることになる。

他方、実河川での摩擦速度の算定は、洪水痕跡及び一次元又は準二次元計算により算出する手法⁸⁾、Acoustic Doppler Velocimeterなど⁹⁾を用いる方法がある。掃流砂量のバラツキ具合に大きな影響を与えられとされる複雑な洪水流¹⁰⁾をとらえるには局所的な流れの計測が必要になる。日本の河川における洪水時の計測は木下の業績¹¹⁾以降であり、その後同様の手法を用いた観測が活発になった。すなわち橋上操作艇に代表される小型の無人船にAcoustic Doppler Current Profiler (ADCP)を搭載して鉛直方向に流速分布を計測する方法である。ADCPの観測結果を用いた摩擦速度の算定には、対数則を仮定した手法がしばしば利用されていて¹²⁾、特にSime, L. C., et al.は実河川において水面勾配と対数則から算出する手法の比較を行っている¹³⁾。

著者らは洪水中河道水面下における、あらゆる規模の河床波を含めた局所的な河道状況、またそれに伴い生じる局所的な水理現象を把握することで、上述の掃流砂計測値のバラツキを説明できると想定している。すなわちADCPを搭載した橋上操作艇を用いた横断計測や、数分間係留する定点観測などを組み合わせ、水及び河床の流速場を把握できることが期待されている。現に著者らと国

土技術政策総合研究所河川研究室は共同で流量・流砂量観測高度化のためのプロジェクトを実施していて、橋上操作艇を搭載したADCPによる観測、TR-2に若干の改良を加えた掃流採砂器を用いて、本年度は小中規模出水で複数の観測を行った。本来ADCPを用いた掃流砂計測はRennie, C.D., et al.によってすでに紹介された技術¹²⁾であり、新しい発想ではない。しかしながら、著者らの事前検討により複数の技術的な矛盾点・改良点が見つかった。そのうちの一つである摩擦速度と対地速度の關係に着目し、実験水路内でADCPを用いた摩擦速度・掃流砂量の算定手法の検討を行った。また本技術は実河川での汎用を想定しているため、非定常性を捉える事のできる計測を行うことに主眼を置いて実験を実施した。

2. 計測原理と手法

ボトムトラック機能を有するADCPは船艇に搭載して計測を行う場合、対地速度からADCP本体の移動速度を把握し、自らの位置を特定することができる。しかしながら河床が移動する河道状況では河床の動きとADCP本体の移動状況を分けることができず、それにより流速計測にさえ問題が生じることがある¹⁴⁾。このため高精度なGPSを船艇に搭載して同期させることでこの問題を解決するが、逆に言えばGPSによる船艇の動き、ADCPによる対地速度の差分が河床の移動速度となる。

掃流砂量の算定の一つの主流であるBagnold型の算定式は掃流砂量を「土砂の移動速度」×「移動層厚」と定義した。江頭らの研究グループは同様の考えで、河床の移動速度、移動層厚のそれぞれの項について解析している¹⁵⁾。掃流砂量を算定する式は

$$q_B = \int_0^{h_s} c \cdot u \cdot dz \cong v_s \cdot h_s \cdot c_s \quad (1)$$

ここで q_B は単位幅掃流砂量、 c は土砂濃度、 u は土砂移動速度、 h_s は移動層厚を示す。また v_s は平均土砂移動速度、 c_s は平均土砂濃度である。ここでADCPの対地速度を適用する最大の利点は、この対地速度を土砂移動速度として使用することができることである。ただし移動層内の土砂に流速分布があることが江頭によって指摘されている¹⁵⁾が、著者らはADCPの対地速度を平均土砂移動速度と仮定した。次に移動層厚に関しては直接的に計測することは難しいので江頭らの手法を用いる¹⁶⁾。その式は

$$\frac{h_s}{d} = \frac{1}{c_s \cdot \cos \theta \cdot \{\tan \phi_s / (1 + \alpha) - \tan \theta\}} \tau^* \quad (2)$$

となる。ここで d は河床材料、 θ は河床勾配、 ϕ_s は砂粒子間の内部摩擦角、 α は動的水圧と静的水圧の比、 τ^* は無次元掃流力である。ADCPは4本のビームで河床高を計測しているため、 θ はその高さの違いから算出した。 τ^* の算定には前述のとおり対数則を適用することが一

般的^{12),13)}である。

一般的な河床波の異なる位置における流速分布は日野らにより実験的・理論的に検討が行われている¹⁷⁾。それによると河床波のcrestにおける流速分布は河床付近の流速が最も早くなる。このような流速分布をADCPの計測結果から対数則をあてはめて摩擦速度を算定すると、ゼロ又は負の値を取ることになる。しかしながら河床近傍の流速はゼロと仮定し、ADCPの計測値の最下点における流速が早いとき、流速差は最も大きくそれ故に摩擦速度は大きくならなくてはならない。他方troughにおける流速分布は河床付近の流速が遅くかつ流速差も小さいことから摩擦速度は極めて小さいが、水面付近の流速が早いことから、対数則をあてはめて摩擦速度を換算すると過大評価になる。上記河床波周辺での流速の分布状況、Rennie, C.D., et al.が採用したような計測範囲全体に対数則をあてはめて換算することから派生する問題を解決するため、河床付近の流速分布に対数則を当てはめ摩擦速度を算定する中川らの手法¹⁸⁾を採用した。著者の作成したアルゴリズムの概要を次の段落に示す。

① 計測範囲において対数による回帰曲線の傾きから摩擦速度の計算を行い、それを u_{*1} とする。② 河床近傍で仮定する微少な流速、計測領域の下端から対数曲線を当てはめ、その傾きから摩擦速度を算定しそれを u_{*2} とする。③ $u_{*1} > u_{*2}$ であれば流速分布は二瘤の不自然な形になる。ここではS字のような途中に変曲点を持つ曲線を当てはめるため不観測領域にべき乗則の離散値を外挿する。④ 逆に $u_{*1} \leq u_{*2}$ であれば対数曲線の離散値を外挿する。⑤ 計測結果、③又は④で与えられた外挿値を用いてフーリエ級数展開による曲線近似を作成する。このときフーリエ級数展開の項数を無限大にすると近似曲線は観測結果を忠実に再現するためジグザグ状の分布となってしまう。ここではADCPの出力値の一つである誤差流速を用い、この近似曲線と観測結果に同誤差流速程度の差を認め、項数を決定することでよりスムーズな曲線を得る。⑥ 最後に④の場合⑤で得られた曲線の河床から流速が局大値を持つ地点までの流速分布に対して対数則を当てはめ、その傾きから摩擦速度を算定する。③の場合、摩擦速度を対地速度とする。ここでは河床波の位置によらず全計測結果についてこの手法を適用した。

以上、ADCPの対地速度による土砂の移動速度の計測、著者等の摩擦速度の算定手法の適用、式(2)及び河床勾配の直接的な測定による移動層厚の算定から、橋上操作艇の計測地点における掃流砂計測手法が完成することになる。今後はこの手法を用いて解析を進める。

3. 実験方法

本研究は国土総合政策研究所の所有する大型実験水路（水路幅4m、深さ1m、長さ80m）を用いて移動床実験

表-1 実験条件

Case	流量, m^3/s	水面勾配	u_* , m/s	τ_*	河床形態
1	1.7	1/1374	0.055	0.047	砂礫
2	2.5	1/1166	0.073	0.082	砂礫
3	3.5	1/483	0.104	0.167	砂礫
4	4.0	1/186	0.127	0.248	砂礫

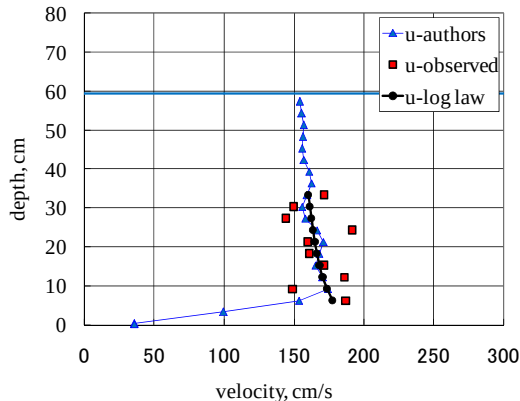


図-1 Crestにおける鉛直方向流速分布の一例

を行った。計測範囲は下流から8～23mの15m区間とした。河床材料は4mmの単一粒径である。初期河床は下流端から40mまでを30cm程度の厚さにし、勾配は実験条件により異なる。水深は初期河床から60cm程度に調整した。その他の実験条件を表-1に示す。ここで記述した u_* 及び τ_* は計測中の全計測区間15m内のエネルギー勾配を基に算出した値である。計測の際には5mの長さを持つ計測台車に観測機材を搭載し、6分の計測を行った後、残りの2カ所で同じ計測を行い、一つの設定流量に対して3回の計測を行った。上流からの給砂などは行っていないが、すべての実験で計測区間の河床が剥き出しになるようなことはなかった。計測台車の実験水路中央に静電容量式水位計を1m間隔で6個、下流から2mの中央から左岸側へ25cm離れた場所にADCPを配置した。水位計は20Hz、ADCPは1Hzに設定した。使用したADCPはTeledyne RDI社製のStreamPro ADCP(2.0 MHz)である。計測原理は通常の河川計測用に用いられているWH-ADCPとほぼ同じであるが、最低層厚が2cmであること、計測に必要な水深がWH-ADCPと比較すると小さいこと、またトランスデューサのサイズが直径3.5cmであることからこれを採用した。StreamPro ADCPの詳細はTRDI社のホームページなどを参照されたい。本実験では層厚を3cm、上層不観帯を10cm、初期水位で水面から15cmの位置にADCPを設置した。実験水路内の掃流砂量に関してはTR-2を5回程度、一回あたり1分間計測を行った。この計測は必ずしもADCPの計測時間と同期しているわけではない。

4. 計測結果

表-2 異なる位置における摩擦速度及び対地速度

図	位置	u_* -log law	u_* -authors	bedload velocity
1	Crest	-4 cm/s	27 cm/s	45 cm/s
2	Trough	21 cm/s	4 cm/s	4 cm/s

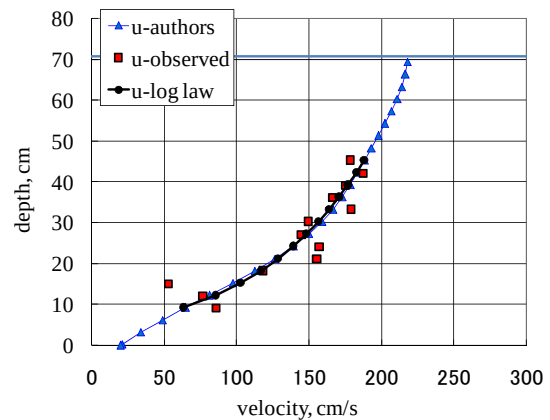


図-2 Troughにおける鉛直方向流速分布の一例

(1) 鉛直方向流速分布

図-1はCase 3の結果の一例であり、Crest上で計測された流速分布の一つを示す。赤■が実際に計測された主流方向流速の鉛直分布である。一方黒●はADCPの計測結果を対数則の最小二乗曲線であてはめた曲線である。また青▲は著者らの手法により算定した曲線である。これは日野らのcrest上の曲線と似た流速分布を示した。図-2は図-1と同様に、troughで計測された流速の鉛直分布の一例を示す。水深全体にかけて流速が広く分布しているため対数則から算出する摩擦速度は大きい。しかしながら河床付近の流速差は小さいため摩擦速度としては小さい値を示す必要がある。表-2に図-1及び2のときの対数則から算定した摩擦速度； u_* -log law、著者らの手法による摩擦速度； u_* -authors、対地速度；bedload velocityをまとめた。この結果からも明らかのように、Crestでのbedload velocityが大きい、 u_* -log lawは小さく、 u_* -authorsは大きくなった。またtroughでは逆の傾向になる。外力を摩擦速度とし、結果河床が動く速度を対地速度と考えると u_* -log lawは実態を表現しないことがわかり、 u_* -authorsを適用する必要性が理解できる。

(2) 摩擦速度

図-3はCase4のときの実験結果の一例で、河床高、水位、 u_* -log law；青▲、 u_* -authors；赤●、水面勾配から算出した摩擦速度(u_* -water slope)；×、bedload velocity；緑□の時間変化を示す。これらのデータは10秒の移動平均が施されている。

図が示すように、実験水路内の水理現象は非定常性が強い。計測期間内に20cm程度の2つの小規模河床波が通過したことがわかる。0～140秒の区間にかけて青▲(u_* -log law)が強い非定常性のもとで大きく振動している。

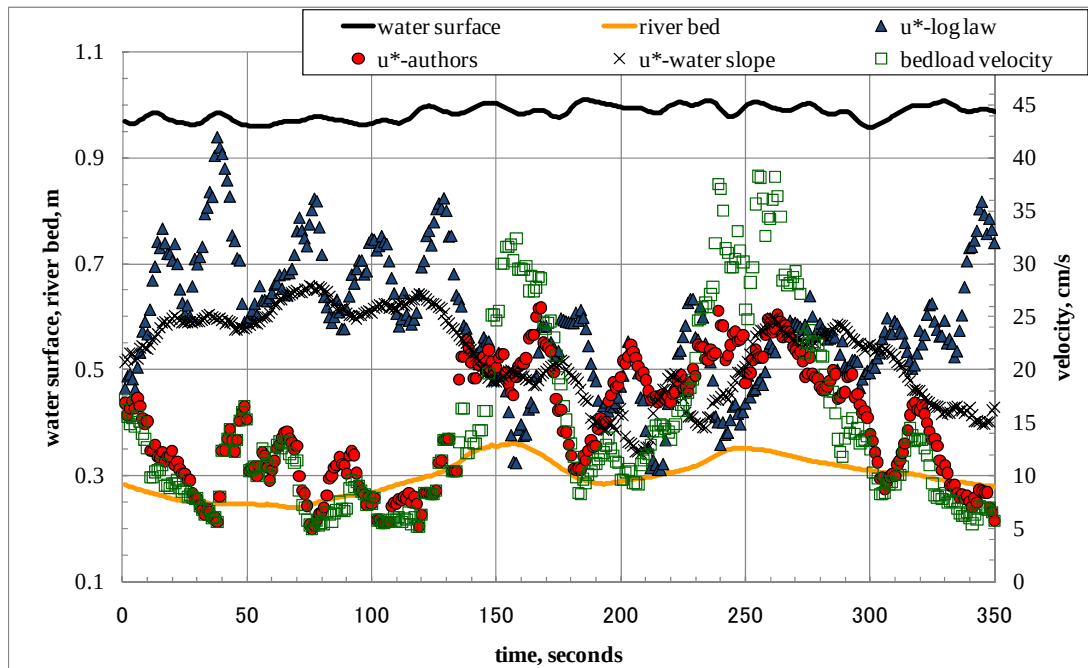


図-3 河床高、水位、対数則を用いた摩擦速度(u_* -log law)、著者等の手法を用いた摩擦速度(u_* -authors)、水面勾配から算出した摩擦速度(u_* -water slope)、対地速度(bedload velocity)の時間変化

また同様に×(u_* -water slope)は同じような周期で振動しているが、こちらの方の振幅は少ない。一方、200秒付近、325秒以降でこれら二つの摩擦速度の共通点はなくなる。これに関しては図-4を用いて議論を進める。また緑□(bedload velocity)に着目すると河床波のcrest部分では最も早く、trough付近では遅い。現に緑□(bedload velocity)対青▲(u_* -log law)/×(u_* -water slope)は逆相関を持ち、緑□対赤●(u_* -authors)とは正の相関が見られる。ほぼ同じ関係が他の実験結果からも得られている。

最も一般的な摩擦速度の算定方法である水面勾配による方法、ADCPの鉛直分布から対数則を仮定して算出する方法の両者はお互いに強い相関を持つものの、それらは対地速度とは逆相関を持つことがわかった。また対地速度と著者らの手法が算定する摩擦速度は正の相関を持つことがわかった。表-2でも述べた通り対地速度と摩擦速度は正の相関を持つべきであることから、著者らの摩擦速度を算定する手法の妥当性が示された。

今後図-4～6ではすべての観測結果を10秒の移動平均後表示している。

図-4に水面勾配と対数則から算出した摩擦速度の関係を示す。黒◆と赤●は相関係数が0.35以上のときとそれ以下のときの例である。なおこの相関係数は6台の水位計から最小二乗直線を取り水面勾配を算出する際に出てきた相関係数 R^2 値であり、これは水面勾配から算出した摩擦速度の信頼度を示すものである。また緑と青の直はそれぞれの点の最小二乗回帰直線で、両者の式と R^2 値を示した。なお黒◆と赤●は同程度の計測個数だった。この図が示すように、 u_* -loglawが負の値を持つこともあるが、これは図-1に代表する流速分布が出す数字である。

次に赤●の u_* -water slopeはかなりの頻度で負の値を持つ。これは実験水路内の流向は一定でもあるにもかかわらず逆勾配の水面勾配を持つことを意味するが、このときの相関係数は0.35以下であるため、水面勾配からの摩擦速度の算定が精度良く行われなかったものと考えられる。最も大事なことは相関係数が0.35以上のとき、両者の関係は良く一致していることである。それ以下のときはあまり良い関係とは言えない。この事実よりわかることは、摩擦速度の算定においては水面勾配から算出するものが一般的であるが、非定常性を持つ流れの中での計測は簡単ではないこと、相関係数が0.35以上であれば両者はほぼ等しいことが理解できる。これらのことから判断して著者らは対数則から算出した摩擦速度を従来の水面勾配を用いる算定方法の代替手法として考えることができる。と判断する。

図-5は著者等の算定方法による摩擦速度と対地速度の関係を示す。青◆は移動平均後の計測結果、赤■は u_* -authorsを0.05m/s毎に分割して平均した値である。緑の曲線は赤■を用いた指数関数の最小二乗曲線である。ここでは u_* -authorsとbedload velocityとの関係が一貫して増加関係であることを示すに留める。また u_* -authorsが0.08m/s以下ではbedload velocityはほとんど増加しない。河床材料が4mmの単一粒径で移動限界が0.06m/sであることを考えると妥当な結果である。以上の結果から著者らが開発したアルゴリズムを用いた摩擦速度の算定方法は、土砂移動の結果である対地速度と正の相関があり、摩擦速度としては、対数則を用いた摩擦速度よりも妥当であることがわかった。

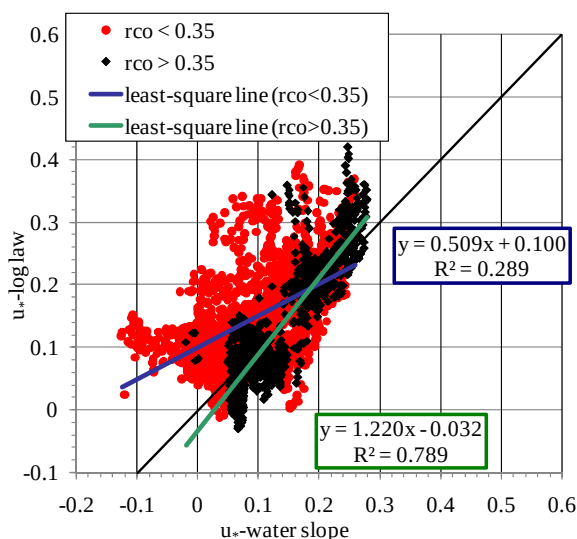


図-4 水面勾配と対数則から算出した摩擦速度

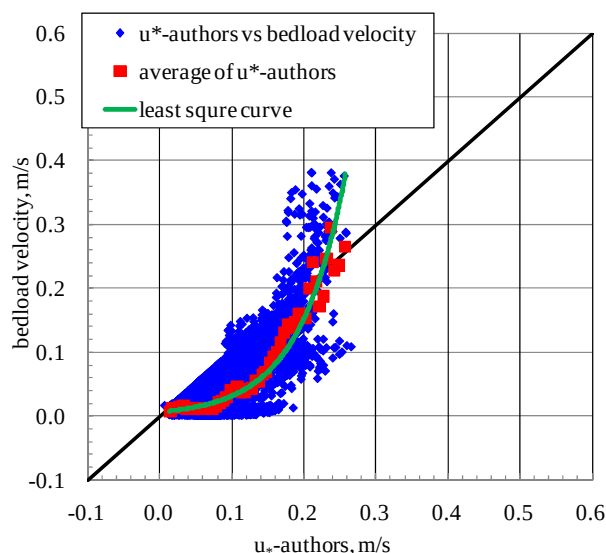


図-5 著者等の算定方法による摩擦速度と対地速度の関係

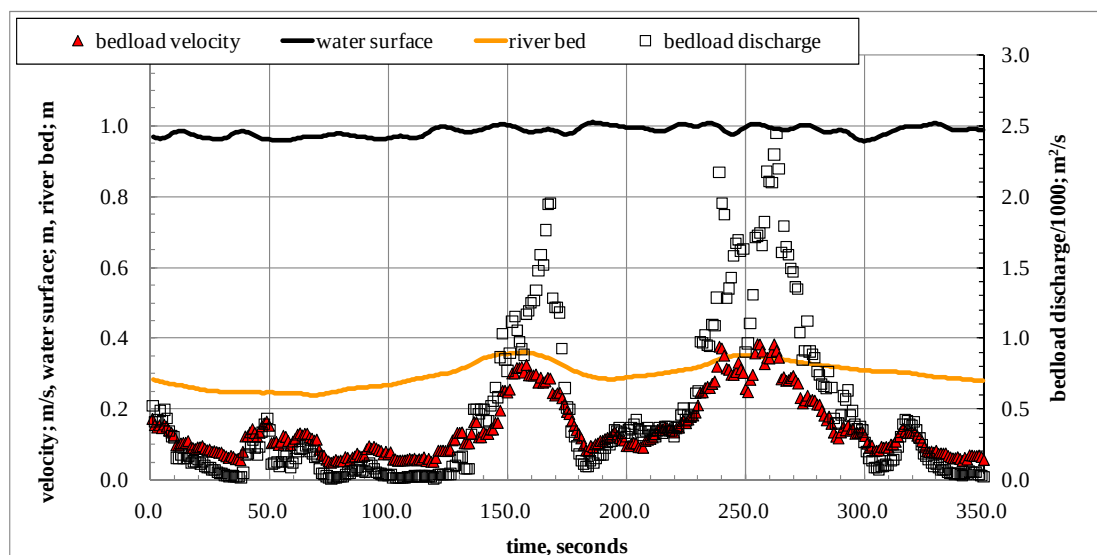


図-6 掃流砂量 (bedload discharge), 対地速度 (bedload velocity), 水位, 河床高の時間変化

(3) 掃流砂量

図-6は著者等の掃流砂計測手法を用いて換算した掃流砂量 (bedload discharge) ; 黒□, bedload velocity ; 赤▲, 水位, 河床高を示す。これはCase4の結果の一つである。図からもわかるように、水位以外の全ての項目は、赤▲ (bedload velocity) と正の相関を持つ。特に小規模河床波が通過したと考えられる160, 250秒では黒□ (bedload discharge) が最も大きくなる。このときの値は $2.0 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度、またはそれ以上であり、平均と比較すると大量の流砂が通過したことになる。一方小規模河床波のtroughである50, 205, 320秒においても $0.5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度、また110秒においては $0.05 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度の値を持つ。このように同じ実験条件であっても計測時間によっては 10^2 程度の違いがある。これは前述の実河川で計測された掃流砂量のバラツキほどではないが似ている。

表-3は著者等の手法を用いて算出した掃流砂量の平均

と標準偏差, TR-2を用いてサンプリングした掃流砂量の平均とそれぞれの標準偏差, 計測範囲全体の水量及び芦田・道上式より算定した掃流砂量を示す。両計測結果は多少のバラツキは否めないが、芦田・道上式¹⁹⁾と比較してもオーダーとしてはほぼ等しい。図-6が示した通り河床波の通過状況によっては 10^2 程度の違いがあるため、Case4の標準偏差は平均よりも大きい。またCase1からCase4は流量が徐々に大きくなるが、それに従い標準偏差も大きくなっている。ここでは示さないが流量規模が多くなると河床波の振幅も大きくなるため、同様に平均、標準偏差が大きくなることは納得ができる。TR-2での直接的な計測結果に関しても同様に標準偏差が大きくなっている。但しCase3の平均量が最大値である事に違和感を覚えるが、この手法はADCPによる算定手法とは異なり、水面下に沈めるタイミングによって採取量が大きく変わることから、この数字もまた妥当であると判断する。

表-3 掃流砂量の比較. 単位は $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}/1000$

Case	(1) ADCP	(1)の標準 偏差	(2) TR-2	(2)の標準 偏差	芦田・ 道上式 ¹⁹⁾
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
3	0.14	0.15	0.24	0.13	0.21
4	0.36	0.41	0.22	0.14	0.45

5. 結論

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) ADCPの対地速度による土砂の移動速度の計測，著者等の摩擦速度の算定手法の適用，河床勾配の直接的な測定による移動層厚の算定から，ADCPを用いた掃流砂計測手法を提案し，実験水路内で検証を行った。
- 2) 掃流採砂器による結果と比較して，本計測手法の妥当性を確認した。
- 3) 非定常性の強い河床における掃流砂量の挙動を確認した結果，6分程度の計測中に 10^2 程度のバラツキがあることを確認した。
- 4) ADCPを用いて対数則を仮定した摩擦速度の算定方法は，既往の水面勾配を用いる算定方法と比較した結果，水面勾配の計測条件が良好なときに限りほぼ同じ結果となった。
- 5) 外力（対数則を用いた摩擦速度）とその結果（対地速度）は相関を持たなかった。一方著者らの手法により算出した摩擦速度と対地速度は正の相関を持ち，両者は増加関係となることから，著者らの手法の妥当性を示した。

謝辞：本論文を作成するにあたり，特に掃流砂算定式に関して株式会社ニュージェックの江頭進治工学博士から，またADCPに関して株式会社ハイドロシステム開発の橘田隆史氏から貴重なアドバイスを頂いた。最後に本論文で使用した実験結果については，国土技術政策総合研究所河川研究室から提供いただいた。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所；建設省流砂観測資料集、土木研究所資料第625号、1971.
- 2) 山本晃一，西尾正博：粗砂・細礫を河床材料に持つ河川の河床波・粗度・流砂量，土木研究所資料，第2944号，1991.
- 3) Dallas C.: Field Comparison of Six Pressure-Difference Bedload

Samplers in High-Energy Flow, *U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report* 92-4068, 59p, 1999.

- 4) 桑村貴志，宮藤秀之，山崎久勝：音圧を利用した掃流砂観測手法の開発，水工学論文集，第46巻，pp.631-636，2002.
- 5) 山本浩一ら：河床変動観測へのヘッド回転型サイドスキャンソナーの適用に関する研究，河川技術論文集，Vol.10，pp.297-302，2004.
- 6) 横山勝英ら，超音波による河床波・転動粒子の追跡と掃流砂量の推定方法，水工学論文集，第50巻，pp.949-954，2006
- 7) 例えば吉川秀夫編著：流砂の水理学，丸善株式会社，1985
- 8) 国土技術研究センター：河道計画検討の手引き，山海堂，2002.
- 9) Strom K. B., et al.: ADV measurements around a Cluster Microform in a Shallow Mountain Stream, *J. Hyd. Eng.*, Vol. 133, No.12, 2007.
- 10) Nezu I., and Nakagawa H.: Turbulence in Open-Channel Flows, A.A.Balkema Publishers, 1993.
- 11) 木下良作：河川下流部における洪水流量観測手法に関する一提案，*J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.* Vol.11, No.5, 1998.
- 12) Rennie, C.D., et al.: Measurement of bed load velocity using an Acoustic Doppler Current Profiler, *J. Hyd. Eng.*, Vol. 128, No.5, 2002.
- 13) Sime, L, C., et al.; Estimating shear stress from moving boat acoustic Doppler velocity measurements in a large gravel bed river, *Water Resources Research*, Vol. 43, W03418, doi:10.1029/2006WR005069, 2007.
- 14) Mueller D. S., et al.: Correcting Acoustic Doppler Current Profiler Discharge Measurements Biased by Sediment Transport, *J. Hyd. Eng.*, Vol. 133, No.12, 2007.
- 15) 例えば，芦田和男，江頭進治，中川一：21世紀の河川学，京都大学学術出版会，2008
- 16) Egashira, S. and Itoh, T.: Paradoxical discussions on sediment transport formulas. *Proceedings of River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM. Parker and Garcia (eds)*, Taylor and Francis Group, London, 33-38, 2005
- 17) 日野幹雄，宮永洋一：波状境界をもつ二次元管路流の解析，土木学会論文報告集，第264号，pp.63-75，1977.8.
- 18) 中川博次ら：各種河床条件における縦渦を伴う流れの乱流構造，京都大学防災研究所年報，第24号B-2，1981
- 19) 芦田和男，道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，pp.59-69，1972

(2009. 9. 30受付)